

Rancang Bangun Sistem Pengukuran Posisi Target dengan Kamera Stereo untuk Pengarah Senjata Otomatis

Anas Maulidi Utama, Djoko Purwanto, dan Ronny Mardiyanto

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail: djoko@ee.its.ac.id, ronny@ee.its.ac.id, anas13@mhs.ee.its.ac.id

Abstrak—Salah satu hal yang penting dalam mengarahkan senjata secara otomatis ke target adalah informasi posisi dari target terhadap senjata. Terdapat banyak metode untuk mengetahui posisi target. Salah satunya adalah dengan metode pengukuran *triangulasi*. Metode ini membutuhkan minimal dua citra untuk mendapatkan informasi jarak target terhadap kamera. Kemudian, informasi jarak tersebut bisa diolah untuk mengetahui posisi target terhadap senjata. Di dalam sistem ini, *stereo visual* digunakan untuk mendukung proses pengukuran *triangulasi*. *Stereo visual* menggunakan dua kamera untuk menghasilkan dua citra. Dalam sistem ini, salah satu kamera bertindak sebagai pemilih target. Citra yang ditangkap dua kamera tersebut akan diproses oleh *processing unit* untuk mendapatkan informasi posisi target terhadap senjata. Informasi ini digunakan untuk menggerakkan motor pada *platform* senjata agar senjata mengarah ke target. Hasil pengujian yang dilakukan pada sistem ini adalah sistem dapat menentukan posisi target yang dipilih oleh operator dan juga dapat mengarahkan senjata ke arah target tersebut. Akurasi tertinggi dalam penentuan posisi target dicapai ketika jarak antar dua kamera sekitar 30 cm.

Kata Kunci—pengukuran posisi, *stereo visual*, *triangulasi*, teknologi senjata.

I. PENDAHULUAN

OTOMATISASI telah menjadi hal yang terus dikembangkan dalam beberapa dekade ini seiring dengan perkembangan teknologi yang begitu cepat. Hal ini bertujuan untuk membantu bahkan untuk menggantikan peran manusia dalam melakukan sesuatu. Pengembangan otomatisasi juga terjadi di dunia militer. Penggunaan senjata dan alat-alat militer pada saat ini sudah mulai mengarah agar peran manusia dikurangi di dalamnya, walaupun masih dalam tahap semi otomatis. Salah satu contoh otomatisasi dalam dunia militer adalah pengarah senjata otomatis.

Otomatisasi senjata dalam beberapa aspek semakin diminati karena memiliki beberapa keuntungan. Beberapa keuntungan yang bisa didapatkan dalam penggunaan senjata otomatis di antaranya adalah mengurangi *human error* dan mengurangi korban manusia di sisi militer. Dengan berkurangnya *human error*, kejadian salah tembak atau jatuhnya korban yang tidak diinginkan dapat dicegah atau diminimalkan.

Selain itu, otomatisasi senjata juga dapat digunakan untuk melawan beberapa macam bentuk terorisme, misalnya, penyanderaan oleh sekelompok teroris. Dengan menggunakan

senjata yang telah diotomatisasi, pelumpuhan teroris dapat dengan cepat dilakukan dan dapat mengurangi kejadian salah tembak terhadap korban penyanderaan.

Mengarahkan senjata secara otomatis artinya senjata akan mengarahkan bidikannya ke arah target jika menerima perintah dari suatu *processing unit*. Beberapa metode telah dikembangkan untuk mengarahkan senjata secara otomatis, seperti pemasangan sensor-sensor untuk mendeteksi target. Namun, metode-metode tersebut akan membutuhkan biaya yang besar jika senjata yang dibutuhkan cukup banyak karena satu senjata satu sensor pendeteksi target.

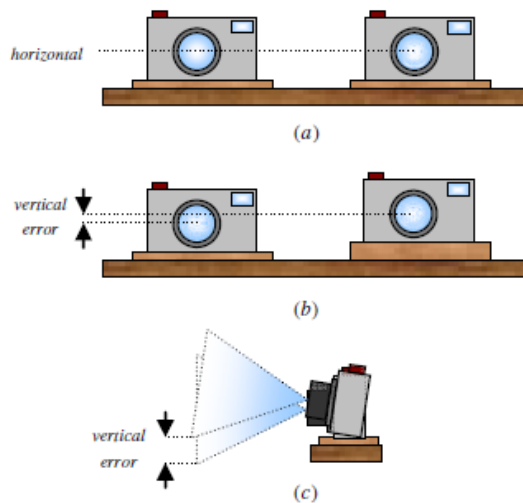
Dalam mengarahkan senjata ke target, sebenarnya, *processing unit* pada suatu sistem senjata otomatis hanya membutuhkan informasi posisi target terhadap senjata. Jika posisi target dalam koordinat *kartesian* bisa diketahui, *processing unit* bisa mengendalikan beberapa senjata sekaligus untuk mengarahkan senjata ke target. Dalam beberapa dekade ini, telah dikembangkan kamera stereo untuk mengukur posisi jarak objek dalam koordinat *kartesian*. Kamera stereo hanya membutuhkan dua kamera untuk memetakan posisi objek yang dipilih sebagai target. Dengan informasi posisi tersebut, senjata dapat diarahkan secara otomatis dan sudut elevasi senjata untuk penembakan dapat ditentukan. Diharapkan agar sistem ini dapat menutupi kekurangan yang ada pada manusia untuk melakukan tugas serupa dan dapat mencegah timbulnya korban yang tidak diinginkan maupun terjadinya kesalahan yang terjadi akibat keterbatasan yang dimiliki oleh manusia.

II. TEORI PENUNJANG

A. Stereo Vision

Stereo vision merupakan cabang penting dalam penelitian di area *computer vision* [1]. *Stereo vision* menggunakan dua citra yang diambil dalam waktu yang hampir bersamaan pada suatu area dan arah yang sama. Dengan menggunakan *stereo vision*, jarak objek-objek yang ada di kedua citra bisa diukur dengan menggunakan beberapa metode pengukuran jarak yang berdasarkan *stereo vision*, seperti metode *triangulasi*. Untuk melakukan pengukuran jarak objek menggunakan metode *triangulasi*, ada syarat yang harus dipenuhi, yaitu:

- Kamera harus benar-benar sejajar dan mengarah pada arah yang sama seperti pada Gambar 1.
- Pengambilan dua citra harus bersamaan.



Gambar 1. Peletakan kamera stereo yang sejajar (a) dan peletakan kamera stereo dengan kesalahan vertikal (b) dan (c) [2]

Peletakan dua kamera yang tidak sejajar akan menyebabkan posisi horisontal dari dua citra yang diambil oleh dua kamera tersebut tidak sama. Hal ini akan menyebabkan proses pengukuran jarak dengan metode *triangulasi* tidak dapat dilakukan. Namun, pada praktiknya, peletakan dua kamera agar benar-benar sejajar memang sangat sulit untuk dilakukan.

Untuk mengatasi hal tersebut, dibutuhkan beberapa proses komputasi yang dapat membuat posisi horisontal dari dua citra menjadi sama, yaitu *Stereo Calibration* dan *Stereo Rectification*.

B. Stereo Calibration dan Stereo Rectification

Stereo Calibration merupakan proses penghitungan hubungan geometris dari dua kamera di suatu ruang [1]. Sedangkan *stereo rectification* merupakan penghitungan matriks intrinsik dan ekstrinsik kamera untuk me-*remap* citra stereo agar kedua citra sejajar dalam arah horisontal.

Hasil dari *stereo calibration* adalah parameter-parameter intrinsik dan ekstrinsik dari dua kamera tersebut. Parameter intrinsik merupakan parameter yang mengoreksi kesalahan-kesalahan yang dapat dimunculkan oleh kondisi fisik internal dari kamera, seperti distorsi akibat pemasangan lensa di dalam kamera atau distorsi akibat kecacatan lensa kamera itu sendiri. Sedangkan parameter ekstrinsik mengoreksi ketidak sejajaran dari dua kamera yang berupa kesalahan translasi maupun kesalahan rotasi.

Sedangkan untuk *stereo rectification*, ada banyak metode *rectification*, namun ada dua metode yang terkenal. Yang pertama adalah algoritma *Hartley* yang menggunakan matriks dasar dari citra sehingga tidak perlu dilakukan *stereo calibration*. Metode kedua adalah algoritma *Bouguet* yang menggunakan parameter rotasi dan translasi dari kamera yang telah terkalibrasi

Tujuan dari algoritma *Hartley* adalah mencari matriks homografi yang memetakan garis *epipolar* menuju ke titik tak hingga [3]. Sehingga, metode ini hanya menghitung matriks fundamental. Keuntungan dari algoritma ini adalah proses

stereo calibration dilakukan secara *real time*. Namun, metode ini tidak dapat mendeteksi adanya penskalaan citra.

Sedangkan algoritma *Bouquet* secara sederhana adalah meminimalkan proyeksi ulang dari dua citra stereo [1]. Dengan demikian, sudut pandang yang lebih luas bisa diperoleh.

C. Metode Pengukuran Triagulasi

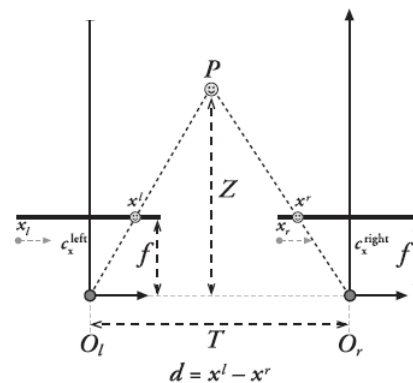
Metode *triangulasi* merupakan salah satu metode pengukuran jarak yang memanfaatkan perbedaan posisi objek pada dua citra yang diambil pada waktu yang hampir bersamaan dengan *stereo vision*. Dengan mengasumsikan bahwa kedua citra diambil dari dua kamera yang benar-benar sejajar, proses penghitungan jarak seperti yang digambarkan pada Gambar 2 akan semakin mudah dilakukan.

Dari Gambar 2 tersebut bisa didapatkan persamaan dari dua segitiga yang sebangun, yaitu:

$$\frac{T - (x^l - x^r)}{Z - f} = \frac{T}{Z} \quad (1)$$

Dari persamaan (1) di atas, bisa didapatkan persamaan jarak objek terhadap kamera, yaitu:

$$Z = \frac{fT}{x^l - x^r} \quad (2)$$

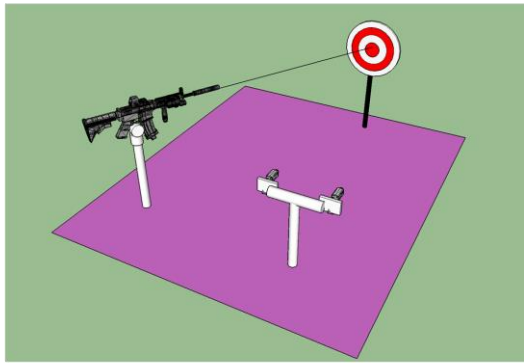


Gambar 2. Konsep Pengukuran Jarak dengan Metode *Triangulasi* [3]

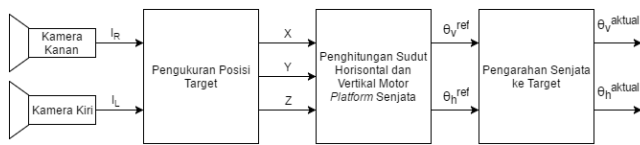
III. PERANCANGAN SISTEM

Ilustrasi sistem ini ditunjukkan pada Gambar 3. Sistem kamera stereo yang merupakan *stereo vision* akan mengukur posisi target. Informasi tersebut akan digunakan untuk menggerakkan *platform* senjata.

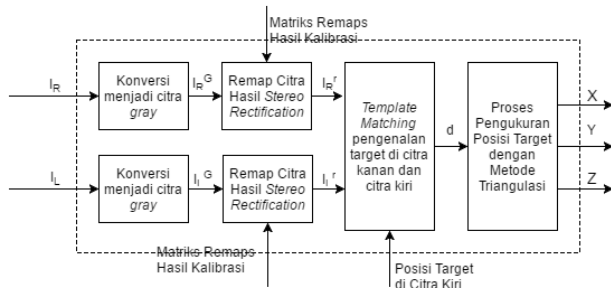
Proses-proses yang ada di dalam sistem ini terbagi menjadi tiga sub-sistem, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Yang pertama adalah proses pemilihan target dan pengukuran jarak yang dilakukan oleh komputer yang dioperasikan oleh *oprator*. Bagian yang kedua adalah proses konversi posisi target menjadi sudut referensi vertikal dan horisontal *platform* senjata. Dan yang terakhir adalah pergerakan senjata yang akan dilakukan oleh *mikrokontroler*.



Gambar 3. Ilustrasi Sistem



Gambar 4. Blok Diagram Sistem



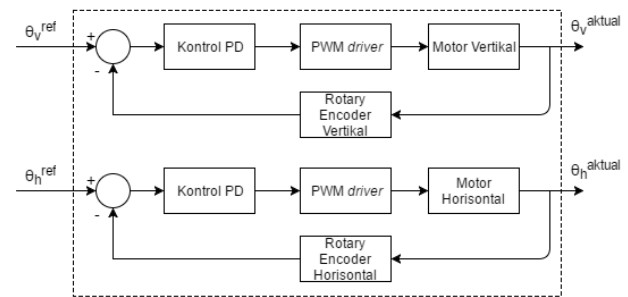
Gambar 5. Diagram Pengukuran Posisi Target

A. Pengukuran Posisi Target

Proses pengukuran posisi target ditunjukkan oleh blok diagram di Gambar 5. Citra kanan (I_R) dan citra kiri (I_L) akan dikonversi menjadi citra satu *grayscale* (masing-masing menjadi I_R^G dan I_L^G). Selanjutnya, kedua citra akan di-*remap* menggunakan matriks *remap* hasil kalibrasi kamera stereo dan proses *stereo rectification* (menjadi I_R^r dan I_L^r). Ketika target di citra kiri dipilih, maka proses pencocokan target yang sama di kamera kanan akan dicari dengan *template matching* dan diperoleh *disparity* target (d). *Disparity* merupakan perbedaan posisi objek yang sama di dua citra kamera stereo, secara sederhana bisa didefinisikan sebagai $x_L - x_R$ [3]. Terakhir, data *disparity* target akan diproses untuk menghasilkan posisi target (X, Y, Z).

B. Penghitungan Sudut Motor Platform Senjata

Pada bagian ini, posisi target yang diproses di komputer akan dikirim secara serial ke *mikrokontroler*. Selanjutnya, *mikrokontroler* akan menghitung berapa sudut motor penggerak vertikal dan penggerak motor horisontal pada *platform* senjata agar senjata mengarah ke arah target. Dengan proses penghitungan sudut pada koordinat *kartesian*, sudut horisontal dan vertikal motor adalah:



Gambar 6. Diagram Pengarahan Senjata ke Target

$$\theta_h = \tan^{-1} \left(\frac{x_{target} - x_{senjata}}{z_{target} - z_{senjata}} \right) \quad (3)$$

$$\theta_v = \tan^{-1} \left(\frac{y_{target} - y_{senjata}}{\sqrt{(x_{target} - x_{senjata})^2 + (z_{target} - z_{senjata})^2}} \right) \quad (4)$$

C. Pengarahan Senjata ke Target

Sub-sistem pengarahan senjata tergambar seperti pada Gambar 6. Untuk mengarahkan senjata, motor penggerak vertikal dan penggerak horisontal dikontrol dengan kontrol PD dengan *set point* untuk penggerak vertikal dan horisontal didapatkan dari konversi posisi target menjadi sudut penggerak senjata. *Kontroler* PD akan mengontrol PWM yang digunakan untuk menggerakkan motor menggunakan *driver* motor sehingga sudut aktual motor berubah. Sudut aktual dari motor akan diumpan balik menggunakan *rotary encoder* yang akan digunakan sebagai sinyal *error* untuk kontrol PD motor-motor tersebut.

IV. HASIL PENGUJIAN

Pada sistem ini, data yang paling penting adalah pengukuran posisi target. Pengujian pengukuran posisi target telah dilakukan beberapa kali. Pengujian pertama adalah pengujian akurasi target. Pengujian lain adalah pengujian pengaruh jarak antar kamera pada sistem kamera stereo terhadap akurasi pengukuran. Untuk pengujian penggerakan senjata, dilakukan *tuning* PID secara manual dan dicari nilai K_p , K_i , dan K_d sehingga gerakan motor vertikal maupun horisontal tidak bergetar saat mencapai nilai *setpoint* atau nilai referensi. Pengujian sistem secara keseluruhan menggunakan sasaran ISSF (*International Shooting Sport Federation*) untuk target 50 m dengan menggunakan pistol.

Tabel 1 menunjukkan hasil pengujian jarak dengan menggunakan fungsi *triangulasi* yang ada pada *library* OpenCV setelah dilakukan kalibrasi kamera stereo dan *stereo rectification*. Hasil yang didapatkan menunjukkan *error* pengukuran jarak kurang dari 5.1%.

Dari Tabel 2 bisa didapatkan beberapa informasi. Yang pertama adalah, jarak terbaik antar kamera agar didapatkan *error* pengukuran yang kecil adalah sekitar 30 cm. Selain itu, untuk jarak kamera lebih dari 40 cm, jarak terdekat yang dapat diukur semakin jauh karena sudut pandang objek dekat dari dua kamera pada sistem kamera stereo akan semakin sulit.

Tabel 1.
Pengukuran Posisi Target dengan Fungsi *Triangulasi OpenCV*

Jarak (cm)	Posisi (cm)			Error Z (%)
	x	y	z	
20	0,5863	4,8837	20,0210	4,8215
30	0,6001	4,8771	29,3015	0,6924
40	0,7892	4,6494	38,5335	1,4488
50	1,1444	4,5772	47,6770	2,8982
60	1,1758	4,0960	57,4070	2,8646
70	1,1225	4,0231	66,1869	3,7981
80	1,5363	4,0311	75,0118	4,8074
90	1,7455	3,8302	85,2407	4,0082
100	1,5902	3,8830	93,7648	5,0964

Tabel 2.
Pengukuran Posisi Target dengan Jarak Kamera Berbeda-beda

Jarak Kamera (cm)	Jarak Objek (cm)	Pengukuran Posisi (cm)			Error Z (%)
		x	y	z	
10	150,0	-38,64	47,28	143,57	4,29
	278,0	9,94	77,58	274,65	1,21
	398,0	-23,98	52,21	394,81	0,80
	511,5	-5,18	25,01	485,92	5,00
	678,0	-7,75	-136,88	631,69	6,83
20	150,0	-36,86	48,03	145,43	3,05
	278,0	20,18	77,82	277,93	0,03
	398,0	-16,00	53,01	390,83	1,80
	511,5	-1,00	35,39	500,26	2,20
	678,0	-5,31	-139,37	625,33	7,77
30	150,0	-16,17	40,56	152,06	1,37
	278,0	27,86	78,86	277,28	0,26
	398,0	-20,99	49,99	392,82	1,30
	511,5	9,80	-40,00	523,75	2,39
	678,0	5,04	-141,04	673,40	0,68
40	150,0	-	-	-	-
	278,0	-	-	278,80	0,29
	398,0	-2,01	62,97	423,56	6,42
	511,5	18,32	-55,30	595,28	16,38
	678,0	-134,28	-204,74	815,75	20,32

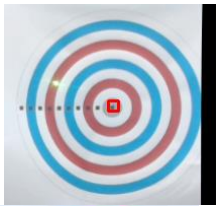




Tabel 3.
Hasil Tuning PID untuk Motor Penggerak Horizontal

No.	Kp	Ki	Kd	$\Delta\theta$	DCmaks	Osilasi	Lama Osilasi
1.	1,0	0,0	0,0	50°	80%	Besar	2s
2.	3,0	0,0	0,0	50°	80%	Besar	1s
3.	3,0	0,0	2,0	50°	80%	Besar	2s
4.	3,0	1,0	2,0	50°	80%	Sangat besar	>10s
5.	0,9	0,0	0,5	50°	80%	Kecil	1s
6.	1,9	0,0	0,5	50°	80%	Kecil	5s
7.	0,9	0,0	1,1	50°	80%	Kecil	<1s
8.	0,9	0,0	1,1	50°	70%	Sangat kecil	<1s

Tabel 4.
Hasil Tuning PID untuk Motor Penggerak Vertikal

No.	Kp	Ki	Kd	$\Delta\theta$	DCmaks	Osilasi	Lama Osilasi
1.	0,9	0,0	1,1	50°	70%	Kecil	2s
2.	0,9	0,0	1,1	50°	40%	Besar	<1s

Tabel 5.
Pengujian Pengarahan Target

Jarak	Target yang dipilih	Target yang disasar	Gambar
160 cm	Ring 10	Ring 4	
250 cm	Ring 10	Ring 7	
370 cm	Ring 10	Ring 8	
500 cm	Ring 10	Ring 6	
650 cm	Ring 10	Ring 3	

Tabel 3 merupakan data hasil pengujian *tuning* PID yang dilakukan secara manual untuk motor penggerak horizontal. Proses *tuning* dihentikan ketika osilasi yang terjadi ketika motor mencapai *setpoint* sangat kecil, yaitu lama osilasinya kurang dari 1 detik. Dari Tabel 3 bisa dilihat, hasil pengujian menunjukkan nilai Kp, Ki, dan Kd untuk motor penggerak horizontal adalah 0,9 untuk Kp, 0,0 untuk Ki, dan 1,1 untuk Kd dengan *duty cycle* maksimum untuk *driver motor* adalah sebesar 70%.

Untuk motor penggerak vertikal, nilai *tuning* PID dimulai dari hasil *tuning* PID motor penggerak horizontal. Dari data yang dihasilkan pada Tabel 4, nilai Kp, Ki, dan Kd sama dengan motor penggerak horizontal. Namun, nilai *duty cycle* motor penggerak vertikal lebih kecil, yaitu 40% saja.

Pengujian sistem secara keseluruhan tertera pada Tabel 5. Target dengan standar ISSF untuk jarak 50 m dengan menggunakan pistol memiliki 10 *ring* dengan diameter *ring* terkecil adalah 50 mm, yaitu *Ring 10*, dan diameter *ring* terbesar adalah 500 mm, yaitu *Ring 1*. Dari pengujian tersebut

bisa diamati bahwa pengarahan target belum mencapai target, yaitu *Ring* 10. Namun, arah senjata masih berada di antara *Ring* 1 hingga *Ring* 10. Dengan demikian, arah senjata masih berada di dalam area target.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang bisa diambil oleh penulis dari tugas akhir ini di antaranya ada dua. Pertama, pengukuran posisi objek menggunakan kamera stereo dengan metode *triangulasi*, menghasilkan kesalahan pengukuran kurang dari 5.1%. Kesimpulan kedua adalah jarak antar kamera pada stereo kamera yang menghasilkan pengukuran posisi objek yang optimum adalah 30 cm dengan kesalahan pengukuran kurang dari 2.5%. Beberapa saran yang penulis bisa berikan untuk pengembangan tugas akhir adalah sistem ini perlu diuji untuk pengujian malam dengan menggunakan kamera yang memiliki fitur *night vision* ataupun infra merah. Selain itu, penempatan posisi senjata dan kamera stereo harus diukur secara akurat untuk meningkatkan akurasi sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zou, L. dan Li, Y., "A Method of Stereo Vision Matching Based on OpenCV", International Conference on Audio, Language, and Image Processing (ICALIP), pp. 185-190, Shanghai, November, 2010.
- [2] Mrovlje, J. dan Vrancic, D., "Distance Measuring Based on Stereoscopic Pictures", 9th International PhD Workshop on System and Control: Young Generation Viewpoint, Izola, October, 2008.
- [3] Bradski, G. dan Kaehler, A., "Learning OpenCV Computer Vision with the OpenCV Library", O'Reilly, Sebastopol, Ch.12, 2008.